

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/



بررسی جهت نورد و هندسه شیار روی رفتار ضربه‌ای آلیاژ آلومینیم AA6061 و AA7020*

مقاله پژوهشی

فرزاد سلیمانی(۱)

DOI: 10.22067/jmme.2024.84343.1124

چکیده *رفتار ضربه‌ای آلیاژ آلومینیم AA6061 و AA7020 نورد سرد شده توسط آزمایش ضربه شارپی بررسی شد. چهار جهت طولی نورد و عرضی طو یل و عرضی کوتاه (در دو وضعیت قرار گیری شیار) مورد بررسی قرار گرفتند. زوایای شیار مورد آزمایش ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰درجه بوده و دماهای آز مایش°C ۶۰-، ۰، ۲۵ و ۱۰۰ انتخاب شدند. از هر متغیر دو نمونه جهت اطمینان و دامنه پراکندگی تهیه گردید. همچنین جهت استحکام بخشی آلیاژهای آ لومینیم ؛فوق از عمل یات حرارتی رسوب سختی T65 استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما مقدار انرژی ضربه افزایش می‌یابد و با افزایش زاویه شیار مقدار ا نرژی ضربه کاهش می یابد و نوع شکست ازحالت برشی به تخت و مخلوطی از هر دو تغییر می‌کند. در جهت طولی نورد کمترین مقدار انرژی ضربه را داشته و در ج هت عر ضی کوتاه بیشترین مقدار انرژی ضربه را دارد.*

واژه‌های کلیدی انرژی ضربه، جهت شیار، شکست برشی، آلیاژ آلومینیم.

Effect of Rolling Direction and Groove Geometry on Impact Behaviour of AA6061 and AA 7020 Aluminum Alloys

Farzad soleymani

Abstract *Impact behavior of cold rolled AA6061 and AA 7020 aluminum alloys were investigated by Charpy impact test. Four longitudinal and long transverse and short transverse (in two groove positions) were studied. The groove angles were 30, 45, 60 and 90 degrees and temperatures tests were dry ice, zero degrees, ambient and boiling water temperatures. Two samples of each variable were taken to ensure the distribution range. Also for strengthening of aluminum alloys T65 precipitation hardening heat treatment was used. The results showed that increasing temperature increased the amount of impact energy and impact energy value decreased with increasing groove angle and failure mode altered from shear to flat and a mixture of both. Samples had the minimum amount of impact energy in the rolling longitudinal direction and the maximum amount of impact energy in the short transverse direction.*

Keywords Impact energy, Groove direction, Shear failure, Aluminum alloy.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۶/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۱۱/۴ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، عضو هیئت علمی دانشگاه پیام نور.

Email: f.soleymani52@pnu.ac.ir

مقدمه

حدود ۸۵ درصد آلومینیم مصرفی، محصولات کار شده از قبیل صفحات نورد سرد شده می‌باشند که از شمش‌های ریختگی به عنوان ماده اولیه استفاده می‌شود و با فرایندهای بعدی به محصول نهایی تبدیل می‌شود و طی این فرایندها ریزساختار نیز تغییر می‌کند [1]. در آلیاژهای پراستحکام آلومینیم فقط حداکثر استحکام کششی را نباید در نظر گرفت و به مقاومت آلیاژ در مقابل شکست نیز باید توجه شود. همچنین باید اثر جهت نورد روی خواص مکانیکی یا همان ان ایزوتروپی را مورد توجه قرار داد. تغییر شکل ورق‌های آلومینیم در دمای محیط منجر به استحکام‌بخشی از طریق ایجاد بافت‌ها می‌گردد. بافت‌های حاصل از کار سرد باعث جهت‌دار شدن خواص مکانیکی می‌شود و باعث افزایش نسبی استحکام تسلیم و استحکام کششی در امتداد تغییر شکل می‌گردد. جهت نورد معمولا در صفحات و محصولات ورق خیلی مهم نیست اما با افزایش ضخامت ورق، اهمیت آن افزایش می‌یابد و در محصولات ضخیم، جهت نه تنها خواص مکانیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد بلکه خواص دیگری مانند مقاومت به ترک‌دار شدن از قسمت عرضی را نیز تغییر می‌دهد. جهت‌دار بودن خواص و ریزساختار بر روی طراحی و شرایط تغییر شکل قطعه کار تاثیر می‌گذارد [2]. جهت مرجح حاصل از تغییرشکل پلاستیک (در فرآیند نورد) به شدت به سیستم دوقلو و لغزش بستگی دارد ولی به زاویه قالب، قطر غلتک، سرعت غلتک وکاهش ضخامت در هر مرحله بستگی ندارد [3]. تبلور مجدد یک فلز کار سردشده،جهت مرجحی تولید می‌کند که از آرایش موجود تغییرشکل محکم تر است و با آن فرق دارد [3]. رشته‌ای شدن مکانیکی تاثیر کمی برشکل دادن دارد ولی رشته‌ای شدن بلوری یا جهت مرجح ممکن است اثر زیادی داشته باشد. ازجهت دارشدن مواد (بافت) برای افزایش مقاومت به تسلیم استفاده می‌شود و همچنین کیفیت در کشش عمیق در اثر بافت صحیح افزایش می‌یابد. در ورق‌های ترانس ازجنس آهن و سیلیسیم، افت انرژی با آرایش دانه در جهت آسان مغناطیسی شدن به حداقل می‌رسد. در خم‌کاری وقتی خم موازی جهت نورد است خم شدن خیلی مشکل تر از وقتی است که خم برجهت نورد عمود است. تغییرشکل و ویژگی‌های شکست یک ماده معین به ماهیت پیوند الکترونی، ساختار بلوری و میزان نظم ماده بستگی دارد. هرچه الکترون‌های ظرفیت ثابت‌تر باشند ماده تردتر است. در مواد با پیوند فلزی،کمترین محدودیت برای حرکت الکترون‌های ظرفیت است و الکترون‌های ظرفیت بطور مساوی در بین تمام اتم‌ها مشترک است و بیشترین آمادگی را برای تغییرشکل دارند [3]. معمولا استحکام کششی در جهت طولی نسبت به جهت عرضی بیشتر است، برای آلیاژهای غیر قابل عملیات حرارتی، خواص مکانیکی را در جهت طولی و آلیاژهای قابل عملیات حرارتی، در جهت عرضی طویل در نظر می‌گیرند [2].

آلیاژهای آلومینیم AA6061 به‌عنوان آلیاژهای ساختمانی با استحکام متوسط دارای خواص جوش پذیری و مقاومت در مقابل ترک خوردگی تنشی هستند. در این آلیاژها منیزیم و سیلیسیم به مقدار متعادل افزوده می شود تا تشکیل آلیاژهای شبه دوتایی Al-Mg2Si (Mg/Si=1.731) دهد و یا با سیلیسیم بیشتر از مقدار لازم تشکیل Mg2Si می‌دهد. این گروه از آلیاژها به پیرشدن حساسیت بیشتری داشته و در یک فرایند جداگانه آنها را تحت عملیات حرارتی انحلال و کوئنچ قرار می‌دهند. مس برای بهبود خواص مکانیکی و کروم برای کاهش تاثیر منفی احتمالی مس بر مقاومت به خوردگی افزوده می‌شود. این آلیاژها به‌عنوان ماده ساختمانی عمومی، موارد مصرف زیادی دارند [1].

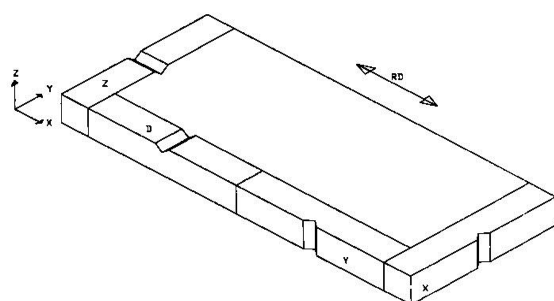
آلیاژهای آلومینیم گروه 7xxx بالاترین توانایی را برای پیرسخت شدن دارند و قابلیت جوش پذیری خوبی دارند از این آلیاژهای برای تسلیحات نظامی و سازه‌های هواپیما استفاده می‌شود همچنین برای کارهایی که نیاز به چقرمگی شکست زیاد همراه با کاهش وزن مخصوص دارند بکار می‌روند [1]. برای تعیین تمایل ماده به رفتار ترد از انواع مختلف آزمایش ضربه استفاده می‌شود و تفاوت‌هایی را بین مواد مشخص می‌کند که در آزمایش کشش قابل مشاهده نیست و با استفاده از آزمایش ضربه شارپی با شیارV شکل می‌توان آزمایش مطمئنی برای شکست ترد انجام داد و از نتایج آن می‌توان مقدار انرژی جذب شده برای شکست را برحسب ژول بدست آورد [4,5].

از بررسی سطح شکست مقدار ترد یا نرم بودن و یا مخلوطی از هر دو را می‌توان به‌صورت درصد تخمین زد. آزمایش ضربه شارپی به‌طور وسیعی بر روی آلیاژهای آهنی صورت گرفته است اما برای آلیاژهای سبک بطور گسترده کار نشده است. خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم با توجه به تغییر دما رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند از آزمایش ضربه در دماهای مختلف می‌توان به محدوده دمای انتقالی آلیاژهایی که دارای دمای انتقالی هستند پی‌برد، همچنین می‌توان مقدار نرمی

نمونه را با توجه به درصد انبساط جانبی نمونه طی شکست بدست آورد [4,5]. پارامتر مهم دیگری که از آزمایش ضربه می‌توان بدست آورد ارتباط آن با چقرمگی شکست است که با توجه به مشکل بودن آزمایش چقرمگی شکست می‌توان از آزمایش ضربه شارپی استفاده نمود [6,7].

روش انجام آزمایش

برای انجام آزمایش از ورق آلومینیم نورد سرد شده AA6061 وAA7020 با جهت نورد مشخص و ضخامت ۱۰mm استفاده شد. قبل از شروع آزمایش آنالیز آن مشخص گردید (جدول۱) و با نمونه استاندارد تطبیق داده شد (جدول۲)؛ سپس نمونه ها با توجه به جهات نورد مشخص مورد نیاز به ابعاد ۵۵×۱۰×۱۰mm برش و ماشین‌کاری شدند. قبل از ایجاد شیار روی نمونه‌ها کلیه نمونه‌ها تحت سیکل عملیات حرارتی رسوب سختی قرار گرفتند برای انجام رسوب سختی ابتدا برای عملیات انحلال نمونه‌های AA7020 در دمای ۴۷۵°C به مدت ۲ساعت در کوره قرار گرفتند نمونه های AA6061 در دمای ۵۳۰°C به مدت ۲ساعت در کوره قرار گرفتند و سپس درآب سرد کوئنچ شدند و برای عملیات پیرسازی به‌صورت مصنوعی قطعات در دمای ۱۵۰°C به مدت۱۲ ساعت قرار گرفتند. هدف ازسیکل عملیات حرارتی فوق به‌دست آوردن حداکثر سختی نبوده است زیرا برای بررسی شکست نیاز به سختی همراه با انعطاف پذیری است. سختی نمونه‌های عملیات حرارتی شده با روش برنیل با ساچمه به قطر ۵ mm و نیروی اعمالی ۱۲۵ کیلوگرم اندازه گیری شد، سپس شیارهایی به عمق ۲mm و شعاع انتهائی ۰/۲۵ mm با زوایای ۳۰،۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه با توجه به جهات نورد مورد نیاز تهیه گردید (شکل ۱). جهت طولی نورد در امتداد محور x و جهت عرضی طویل در امتداد محور y و جهت عرضی کوتاه در امتداد محورz یا همان ضخامت نمونه است که شیار در راستای امتداد محورx است و حالت چهارم جهت عرضی کوتاه با این تفاوت که شیار در راستای محورy ها است و با علامت D مشخص گردیده است.



شکل ۱ نمایش جهات تهیه نمونه با توجه به جهت شیار و جهت نورد

برای انجام آزمایش ضربه از استانداردASTM E23 استفاده گردیده است [8]. دماهای آزمایش یخ خشک (-۶۰°C)، صفر درجه، دمای محیط و آب جوش انتخاب شدند.

قبل از شروع آزمایش ابتدا یک بار آزمایش ضربه را بدون قرار دادن نمونه جهت بدست آوردن انرژی صرف شده جهت اصطکاک هوا و یاتاقان‌های دستگاه انجام داده سپس آزمایش ضربه را برای هر یک از نمونه ها انجام داده و مقدار انرژی ضربه را با توجه به شرایط دستگاه و انرژی اولیه و نهائی آن محاسبه گردید. در نهایت مقطع شکست نمونه ها مورد بررسی قرار گرفتند.

جدول ۱ ترکیب شیمیائی آلیاژ آلومینیمAA6061 و AA7020 مورد آزمایش (براساس درصد وزنی)

آلیاژ	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Al
AA7020	0.20	0.23	0.16	0.086	1.065	4.58	0.04	0.21	0.017	باقیمانده
AA6061	0.57	0.16	0.017	0.029	0.426	0.01	0.007	0.001	0.001	باقیمانده

جدول ۲ خواص مکانیکی استاندارد آلیاژ آلومینیم AA6061 و AA7020

آلیاژ	UTS N/mm^2	YS N/mm^2	El %	E N/mm^2	Tm °C	ρ g/cm^3	BHN
7020-T6	370	290	15	71500	615	280	117
6061-T6	230	180	14	61900	600	270	117

نتایج و بحث

مقدار سختی حاصل آلیاژهای آلومینیم برای آلیاژ AA7020 برابر HB 109 و برای آلیاژ AA6061 برابر 65HB بدست آمده است. برای هریک از نمونه‌ها انرژی ضربه محاسبه و مقدار انرژی اصطکاک از آنها کم شده و نتایج آن در جداول (۳) و (۴) ارائه شده است.

در جهت X (طول نورد) مقدار انرژی ضربه حداقل است. در آزمایش ضربه شارپی نیرو در امتداد جهت شیار اعمال می‌شود. در این حالت نیرو در جهت طولی دانه‌های کشیده شده طی نورد سرد اعمال می‌شود و شیار نیز در همان جهت می‌خواهد به رشد خود ادامه دهد (شکل۲). به همین دلیل با کمترین مقدار انرژی نسبت به حالت‌های دیگر شکست صورت می گیرد. در این مرحله جوانه‌زنی و رشد ترک در امتداد مرزهای طویل انجام می‌شود و موانع بازدارنده از ادامه شکست کم است.

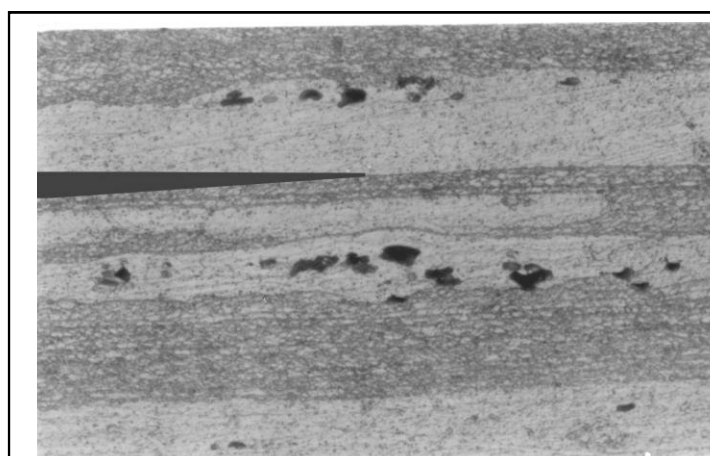
همان‌طورکه در نتایج سطح شکست مشخص گردید در این حالت نمونه‌ها به‌صورت صاف می‌شکنند (جدول ۳ و ۴). در شکست مسطح شرایط کرنش صفحه‌ای حاکم است و مقدار انرژی کمتری جهت شکست صرف می‌شود. در این جهت در هنگام شکست روی نمونه‌ها ترک‌های ثانویه بوجود نمی‌آید (جداول ۶ و ۵). مقدار درصد انبساط جانبی نیز در این جهت مقدار کمی است (جداول ۳ و ۴) و در این حالت مقدار شکست نرم به صورت برشی در لبه‌های نمونه نیز نسبت به دیگر جهات کمتر است (جداول ۶ و ۵). حال اگر همین نمونه را با آزمایش چقرمگی شکست مقایسه نماییم، مشابه حالت T-L یا حالت I برای آزمایش چقرمگی شکست K_{IC} می شود. دراین صورت نیروی اعمالی در جهت عمود بر وجوه شیار است (جهتY) ولی شیار می خواهد درجهت X یا همان جهت طولی (مرزدانه) نورد به رشد خود ادامه دهد، در نتیجه مقدار انرژی صرف شده چقرمگی شکست برای این حالت دارای مقدار متوسطی نسبت به دیگر جهات است [9-12].

جدول ۳ نتایج درصد شکست نرم و درصد انبساط جانبی به‌صورت لبه‌های برشی نمونه‌های آزمایش ضربه آلیاژ آلومینیم AA 7020 در جهات و دما و زاویه شیار مختلف

زاویه شیار (°)	دمای آزمایش (°C)	درصد شکست نرم				درصدانبساط جانبی				انرژی شکست (J)			
		X(C)	Y(A)	(E) Z	D(B)	X(C)	Y(A)	(E) Z	D(B)	X (C)	Y(A)	(E) Z	D(B)
30	-60	46.45	61.5	28	30	5	7	7	10	21	30	40	73
	0	44.75	64	28	20	7	5	9	7	22	26	41	77
	25	40.5	60.25	32	30	5	7	10	14	23	27	42	66
	100	48.85	49.62	30	32	6	7	20	10	24	28	43	61
45	-60	48.8	63.02	32	26	6	7	8	11	29	35	39	73
	0	49.6	68.15	36	24	6	9	8	12	30	38	41	76
	25	52	64.25	32	26	7	6	7	13	33	41	42	68
	100	50.5	56.5	42.25	28	5	8	7	11	35	43	43	56
60	-60	48.85	64.47	28	26	5	6	9	9	28	30	39	74
	0	47.2	47.5	34	26	5	8	8	10	29	33	40	75
	25	43.12	61.57	24	28	4	7	8	14	31	40	42	70
	100	45.6	44	42.25	28	5	9	7	12	33	45	45	62
90	-60	34.45	65	38	28	5	9	9	13	26	29	38	62
	0	45.55	52	36	26	7	7	8	11	29	34	39	65
	25	42.4	50.7	32	36	5	8	7	12	30	37	44	55
	100	51.2	59.5	41.35	30	8	8	9	10	34	39	47	51

جدول ۴ نتایج درصد شکست نرم و درصد انبساط جانبی به‌صورت لبه‌های برشی نمونه‌های آزمایش ضربه آلیاژ آلومینیم AA6061 در جهات و دما و زاویه شیار مختلف

زاویه شیار (°)	دمای آزمایش (°C)	درصد شکست نرم			درصدانبساط جانبی			انرژی شکست (J)		
		X(C)	Y (A)	Z (E)	X(C)	Y(A)	(E) Z	X (C)	Y (A)	Z (E)
30	-60	66.5	67.62	76.25	18	20	20	45	47	50
	0	64	69.37	65	19	18	14	47	48	52
	25	70	69.37	58.75	19	18	5	51	52	53
	100	71.12	38.72	81.25	19	16	14	52	53	55
45	-60	69.37	70.75	75.6	16	17	13	39	40	41
	0	65	61.75	91.25	17	18	8	43	44	45
	25	71.5	59	68.65	20	18	10	47	49	49
	100	60.62	53.25	81.25	16	16	10	50	50	51
60	-60	74.5	90.5	61.75	15	17	4	38	39	40
	0	76.25	68.5	72.25	11	13	22	40	41	42
	25	74.5	73.75	67.62	20	19	18	41	43	44
	100	72.5	66.75	72	12	22	14	44	45	46
90	-60	58.37	61.75	56.5	13	19	10	36	37	40
	0	73.75	76.25	32	18	20	20	38	39	43
	25	91.25	78.12	51.87	23	11	14	39	40	44
	100	47.5	38	73.75	19	16	16	40	45	47



شکل ۲ ساختار متالوگرافی شده نمونه شکسته و ترک‌دار در امتداد محور طولی نورد

جدول ۵ میانگین نوع شکست، عمق ترک برحسب میلی‌متر و جهات ترک‌دار نمونه‌های آزمایش ضربه آلیاژ آلومینیم AA ۷۰۲۰ در جهات و دما و زاویه شیار مختلف (ص = صاف، م = مورب، × = ترک ندارد، √ = ترک دارد)

زاویه شیار (°)	دمای آزمایش (°C)	ترک دارشدن				نوع شکست			
		X(C)	Y(A)	(E) Z	D(B)	X(C)	Y(A)	(E) Z	D(B)
30	-60	×	×	دوطرف 1.5	دوطرف3	ص	ص	م	م زیاد
	0	×	×	دوطرف3	دوطرف6	ص	ص	م	م
	25	×	×	یک طرف2	دوطرف5	ص	ص	م	م زیاد
	100	×	×	یک طرف1	یک طرف3	ص	ص	م	م زیاد
45	-60	×	×	یک طرف 2	دوطرف4	ص	ص	م	م زیاد
	0	×	×	یک طرف1.5	دوطرف3	ص	ص	م	م
	25	×	×	×	دوطرف3.5	ص	ص	م	م زیاد
	100	×	×	یک طرف1	یک طرف3	ص	ص	م	م
60	-60	×	×	یک طرف1.5	دوطرف4.5	ص	ص	م	م زیاد
	0	×	×	یک طرف2	دوطرف4.5	ص	ص	م	م زیاد
	25	×	×	دوطرف2	دوطرف3	ص	ص	م	م زیاد
	100	×	×	یک طرف1	دوطرف1.5	ص	ص	م	م زیاد
90	-60	×	×	×	دوطرف3.5	ص	م کم	م	م زیاد
	0	×	×	یک طرف2	دوطرف4.5	ص	ص	م	م زیاد
	25	×	×	یک طرف1.5	دوطرف2.5	ص	ص	م	م زیاد
	100	×	×	یک طرف 1	یک طرف1.5	ص	ص	م	م زیاد

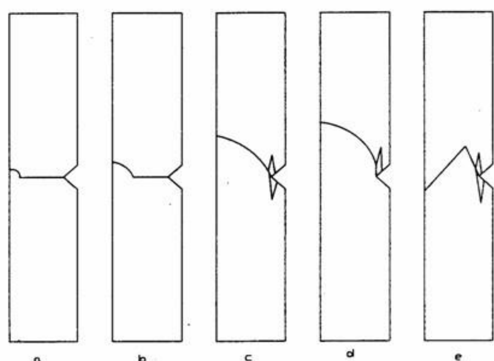
جدول ۶ میانگین نوع شکست، عمق ترک برحسب ملیمیتر و جهات ترک دارنمونه‌های آزمایش ضربه آلیاژ آلومینیم AA ۶۰۶۱ در جهات و دما و زاویه شیار مختلف

زاویه شیار (°)	دمای آزمایش (°C)	ترک دارشدن			نوع شکست		
		X(C)	Y(A)	(E) Z	X(C)	Y(A)	(E) Z
30	-60	×	×	√	ص	کمی م	م
	0	×	×	√	ص	ص	م
	25	×	×	√	ص	م	م کم
	100	×	×	√	ص	کمی م	کمی م
45	-60	×	×	√	ص	ص	م
	0	×	×	√	ص	ص	م
	25	×	√	√	ص	ص	م
	100	×	√	×	ص	ص	م
60	-60	×	√	√	ص	م	ص
	0	×	×	√	م	م	م
	25	×	√	√	م	ص	م
	100	×	×	√	م	ص	م
90	-60	×	×	√	ص	ص	م
	0	×	√	√	م	ص	م
	25	×	×	√	م	ص	م
	100	×	×	√	ص	ص	م

آزمایش ضربه درجهت محور Y یا همان محور عرضی مقدار انرژی بیشتری را نسبت به حالت X جذب کرده است. درنمونه های با جهت محور Y شیار در جهت عمود بر دانه‌های طولی (جهت نورد) است و جهت اعمال نیرو نیز در همان جهت (Y) است. درچنین حالتی شیار می‌خواهد در امتداد خود (محورY) یعنی عمود بر مرزهای طولی دانه رشد کند و باید از مرزهای بیشتری عبورکند و نیاز به انرژی بیشتری دارد. در نتیجه دیده می‌شود که مقدار انرژی جذب شده در این حالت (جهت محورY) بیشترازحالت قبل (جهت محورX) است.

سطح شکست این نمونه‌ها همان‌گونه که در شکل (۴) به‌صورت شماتیک رسم شده است، مقداری از مسیر مستقیم شکست منحرف می شود و یک برجستگی در انتهای مسیر شکست بوجود می‌آید. به عبارتی چنین می‌توان گفت که در سطوح شکست به‌صورت مخلوط مقادیر انرژی جهت شکست در حد متوسط است. در این جهت مورد آزمایش درطی شکست ترک‌های ثانویه مشاهده نشده است و مقدار شکست نرم به‌صورت برشی در لبه‌های نمونه زیاد است. حال اگر چنین نمونه‌ای با آزمایش چقرمگی شکست مقایسه شود، تحت این شرایط دیده می‌شود که نیروی اعمالی در جهت محور X (طولی نورد) است ولی شیار می خواهد در جهت عرضی به رشد خود ادامه دهد پس در نهایت ماکزیمم مقدار انرژی چقرمگی شکست را دارد [13-18].

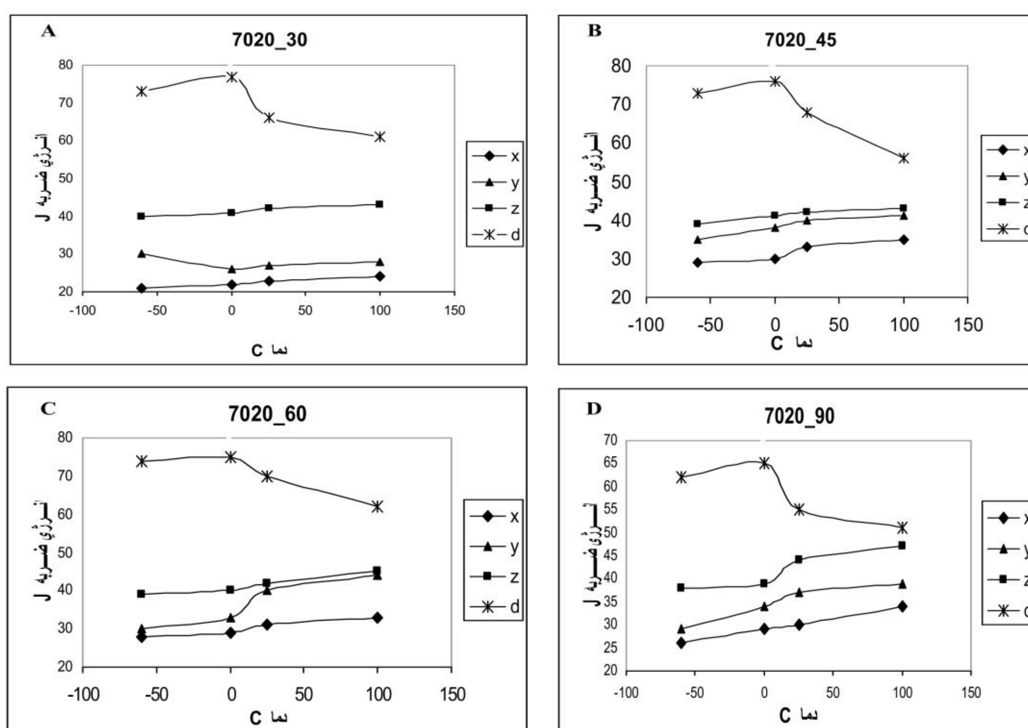
حالت سوم آزمایش ضربه درامتداد محور Z یا همان جهت عرضی کوتاه (S -T)که ضخامت نمونه باشد انجام گرفته است. در این حالت شیار در امتداد لایه های فشرده نورد سرد شده است و جهت اعمال نیرو نیز درامتداد جهت شیار است. مقدار انرژی جذب شده برای شکست بیشتر از دو حالت قبل است (جهت X و جهتY). اما در این حالت شیار به دو صورت می تواند قرار گیرد، یکی در جهت طولی نورد،که نام آن را Z گذاشته و در نمونه دیگر شیار در امتداد محورY قرار گرفته است که نام آن D قرار داده شده است. در نمونه Z شکست در جهت ضخامت نمونه یا همان لایه‌های فشرده صورت می‌گیرد ولی امتداد شیار و شکست در امتداد مرزهای طولی نورد شده از بین لایه‌های نورد شده است. مقدار انرژی صرف شده در این حالت بیشتر از نمونه‌های قبل است (X وY). اما در نمونه D علاوه بر اینکه شکست در امتداد جهت ضخامت نمونه است، شیار در امتداد محورY و دانه های عرضی است. در این حالت بیشترین مقدار انرژی جذب شده را بدست آورده است. نمونه‌های درجهت (Z) شیار در امتداد جهت طولی نورد است و در نمونه‌های (D) عمود بر جهت طولی نورد است. شکست در این شرایط ابتدا تمایل دارد که در امتداد رسوبات و دانه‌های کشیده شده درجهت نورد شروع شود ولی جهت نیرو عمود برآن است و به همین خاطر در ابتدا روی نمونه‌ها ترک‌های ثانویه در امتداد رسوبات بوجود می‌آید و در ادامه مسیر شکست به‌صورت مورب رشد می‌کند و باعث می‌شود که انرژی زیادی جهت شکست صرف شود. شماتیک مسیر شکست نمونه ها در شکل (۳) آمده است. در شکست به‌صورت مورب احتمالا برای ایجاد شکست چقرمه‌تر شرایط تنش صفحه‌ای ارجحیت دارد. شکست نمونه‌ها در این شرایط دارای کمترین مقدار شکست نرم به‌صورت برشی در لبه‌های نمونه است ومقدار درصد انبساط جانبی در این حالت بیشتر از حالت‌های قبل است.



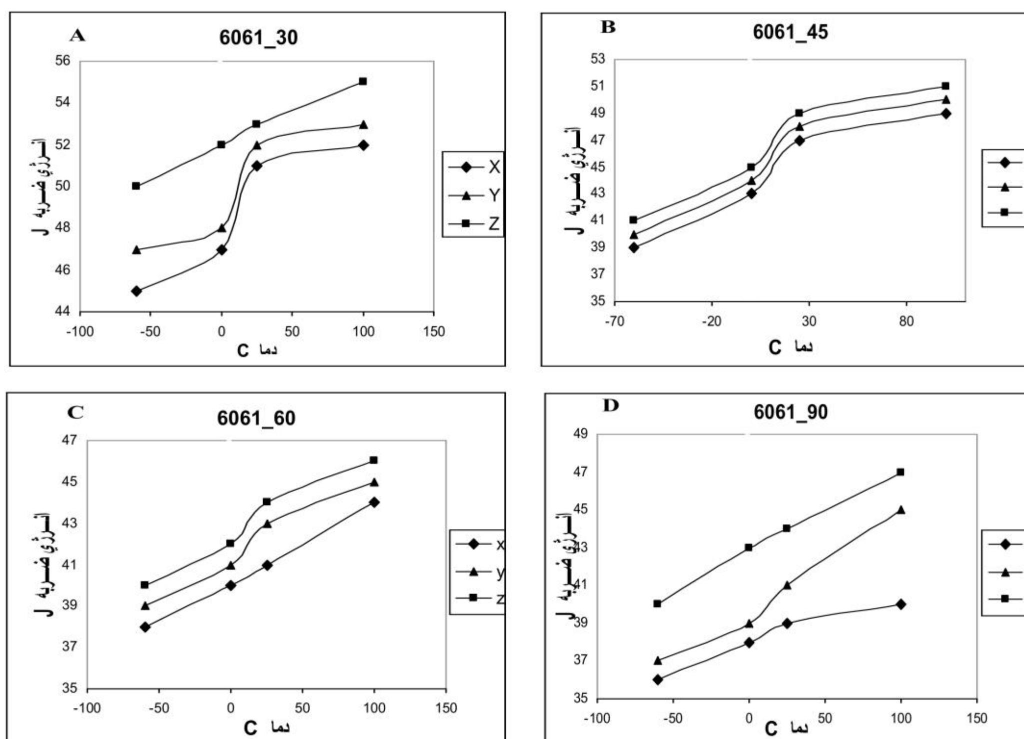
شکل ۳ شماتیک مسیر شکست با توجه به جهت نورد. (a) درجهت X، (b) درجهت Y، (c) درجهت Z و D، (d) درجهت Z و (e) درجهت D

ترتیب افزایش انرژی جذب شده جهت شکست به صورت D – Z – Y – X است. اما مقدار چقرمگی شکست در این حالت (S –T) که در امتداد ضخامت نمونه یا همان محور Z باشد دارای حداقل مقدار است. در این حالت شیار در بین ضخامت نمونه است و نیرو در امتداد محور Z و عمود بر وجوه شیار است، شکست به راحتی در بین لایه های نورد شده صورت می‌گیرد. برای آزمایش چقرمگی شکست در حالت S-T نیز مانند آزمایش ضربه در امتداد محور Z شیار می تواند به دو صورت قرارگیرد، یکی در امتداد دانه‌های طولی و دیگر در جهت عرض دانه ها (Y).

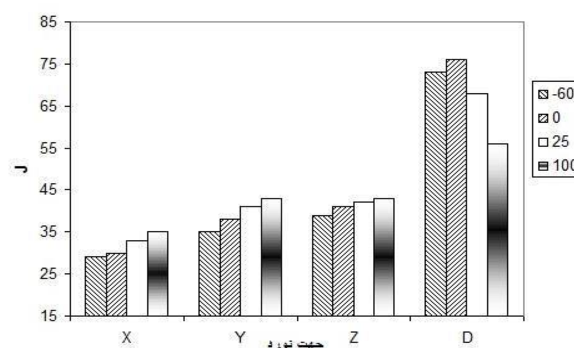
با افزایش دما استحکام تسلیم کاهش می یابد و همچنین مقدار درصد افزایش طول زیاد می شود. با کاهش استحکام و افزایش درصد ازدیاد طول در دماهای بالا، مقدار انرژی جذب شده برای شکست افزایش می یابد. همانطور که مشخص است از تردی قطعه کاسته می شود و شکست به‌صورت نرم صورت می گیرد و انرژی زیادی جهت شکست صرف می‌شود. در دماهای خیلی پایین مقدار درصد ازدیاد طول تغییر نمی‌کند و همچنین تغییر زیادی در انرژی جذب شده جهت شکست صورت نمی گیرد. آلیاژهای آلومینیم دمای انتقالی مشخصی ندارند و با کاهش دما، در دماهای پایین رفتار انتقالی آنها به مقدار کمی تغییرمی کند. با افزایش استحکام در آلیاژهای آلومینیم، با تغییر دما رفتار انتقالی از خود نشان می‌دهند. در اغلب نمونه‌های آزمایش با افزایش دما مقدار انرژی ضربه افزایش یافته است. درآزمایش ضربه آلیاژهایAA7020 درجهت D و در دمای ۱۰۰ °C مقداری کاهش انرژی ضربه مشاهده می‌شود، در صورتیکه در حالت معمول با افزایش دما مقدار انرژی ضربه افزایش می‌یابد. البته ترک‌های ثانویه بوجود آمده درحین شکست در جهت D دارای بیشترین مقدار بوده و در امتداد رسوبات طولی هستند. برای بهتر مشخص شدن تاثیر دما، منحنی‌های انرژی ضربه براساس دما و جهت نورد با زاویه شیار مشخص شکل‌های (۴) و (۵) رسم گردیده است. همچنین در شکل (۶) تصویر سه بعدی ساختارمیکروسکپی آلیاژآلومینیم AA7020 باتوجه به جهت نورد، برای مشخص شدن دانه‌های طولی ورسوبات کشیده شده ارائه شده است. با افزایش استحکام تسلیم، چقرمگی شکست کاهش می یابد و یا می توان گفت با افزایش استحکام تردی بیشتر می شود و شکست در انرژی‌های پایین تر صورت می گیرد. در آلیاژ آلومینیمAA6061 با توجه به پایین بودن استحکام و بالا بودن نرمی مقدار انرژی جذب شده جهت شکست زیاد است و همچنین با افزایش استحکام و کاهش نرمی درآلیاژAA7020 مقدار انرژی جذب شده جهت شکست کاهش یافته است. همچنین می توان گفت آلیاژهای با استحکام پایین و نرمی زیاد برای آزمایش ضربه مناسب نیستند در طی آزمایش ضربه تغییر شکل پلاستیک زیادی از خود نشان می‌دهند. در آلیاژ آلومینیم AA6061 در طی شکست ترک‌های ثانویه خیلی کمی بوجود آمده است اما در آلیاژ AA7020 ترک‌های زیادتر و عمیق تری مشاهده شده است. همچنین درصد انبساط جانبی آلیاژ AA6061 بیشتر از (حدود دو برابر) آلیاژ AA7020 است.



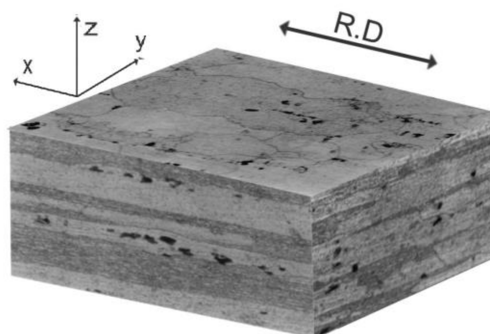
شکل ۴ (الف) رسم منحنی‌های انرژی ضربه براساس دما آلیاژهای‌آلومینیم AA7020 باتوجه به جهات نوردوزاویه شیار. (a) زاویه شیار۳۰ درجه و (b) زاویه شیار ۴۵ درجه و (c)زاویه شیار۶۰ درجه، (d)زاویه شیار۹۰ درجه



شکل ۴ (ب) رسم منحنی‌های انرژی ضربه براساس دما آلیاژهای‌آلومینیم AA6061 باتوجه به جهات نوردوزاویه شیار. (a)زاویه شیار۳۰ درجه و (b) زاویه شیار ۴۵ درجه و (c) زاویه شیار۶۰ درجه (d) زاویه شیار۹۰ درجه



شکل ۵ تأثیرجهت نمونه و دمای آزمایش روی انرژی ضربه آلیاژآلومینیم AA7020 با زاویه شیار ۴۵ درجه



شکل ۶ ساختار متالوگرافی باتوجه به جهت نورد

اغلب سطوح شکست در نمونه‌های AA6061 به‌صورت تخت است و تعداد کمی به‌صورت مورب شکسته شدند، البته زاویه شکست در آنها کمتر از آلیاژ AA7020 است. در آلیاژهای AA6061 درصد شکست نرم به‌صورت برشی درلبه‌های نمونه بیشتر از آلیاژ AA7020 است. نقش ذرات بسیار ریز در رابطه با چقرمگی پیچیده است، زیرا هم تاثیر مثبت دارد و هم تاثیر منفی. وقتی ذرات باعث تاخیر تبلور مجدد و رشد دانه می‌شوند مفید هستند. رسوبات حاصل از پیرسازی آلیاژهای آلومینیم نیز حداقل دو نوع تاثیر بر روی چقرمگی دارند (ذرات تغییر شکل را کاهش و چقرمگی را افزایش می‌دهند). ذرات باعث ایجاد لغزش موضعی درخلال تغییر شکل پلاستیک مخصوصا در شرایط کرنش صفحه ای می شود که منجر به ایجاد لایه‌های لغزشی در جلو ترک درحال پیشروی می‌گردد. کرنش متمرکز شده و باعث ترک سریع در محل ترکیبات بین فلزی درجلوی ترک درحال رشد می‌گردد و باعث افت چقرمگی در بالاترین مقادیر استحکام می‌شود. در شرایط کم پیرسخت شده چقرمگی مقدار حداکثر خود را دارد. با ادامه پیرکردن تمایل بیشتری به شکست در مرز دانه وجود دارد. با تغییر (افزایش) زاویه شیار

مسیر شکست تغییر می‌کند و یا به عبارتی نوع بارگذاری تغییر می‌کند و در نتیجه باعث تغییر نوع شکست می‌شود. در اکثر نمونه‌های آلیاژ AA7020 شکست ترد غالب است و بارگذاری نوع I از اهمیت بیشتری برخوردار است و در آلیاژ AA6061 شکست اکثر نمونه‌ها به‌صورت مخلوط نرم وترد است و بیانگر بارگذاری به‌صورت مخلوطی از انواع III/ II/ I است. همان‌گونه که در جدول های (۳) و (۴) آمده است در اغلب نمونه‌ها با افزایش زاویه شیار مقدار انرژی جذب شده جهت شکست کاهش یافته است. با توجه به جدول‌های (۶) و (۵) در تعدای از نمونه‌هایی که روی آنها ترک ثانویه بوجود آمده، با افزایش زاویه شیار مقدار متوسط عمق ترک‌ها کاهش یافته است. از رسم منحنی‌های تاثیر هم‌زمان زاویه شیار و دمای آزمایش روی انرژی ضربه در تصاویر (۲) و (۳) و (۵) برای آلیاژهای AA7020 وAA6061، مشخص گردید که در زوایای شیار پایین و دماهای بالای آزمایش مقادیر انرژی جذب شده جهت شکست زیاد است.

با تغییر جهت نمونه‌ها به‌صورت X-Y-Z-D ، مقطع شکست در جهت X به‌صورت صاف (تخت) است و در جهت Y مقدار خیلی کمی تغییر می‌کند و یک نوع کندگی در انتهای نمونه (مقابل شیار) مشاهده می‌شود. در نمونه‌های با جهت Z زاویه شکست به‌صورت مورب است و در بعضی از این نمونه‌ها ترک بوجود آمده است و در نمونه‌های با جهت D مقطع شکست به‌صورت مورب و در بعضی زاویه شکست زیاد است همچنین دراغلب نمونه‌ها ترک ثانویه وجود دارد. در اکثر نمونه‌ها مقدار شکست لبه‌های برشی در جهت D کمترین مقدار را دارد و بعد از آن درجهت Z و بعداز آن در جهت X است و بیشترین مقدار لبه‌های برشی درجهت Y دیده شده است. مقدار درصد انسباط جانبی در اکثر نمونه های در جهت D بیشترین مقدار است. در نمونه‌های با جهت Z در هنگام شکست دریک طرف نمونه ترک بوجود آمده است و میانگین عمق ترک mm ۲ است، اما در نمونه‌های درجهت D ترک در دو طرف نمونه بوجود آمده است و میانگین عمق ترک mm ۴ است. همچنین در این حالت مقدار عمق ترک با افزایش دما کاهش یافته است و با افزایش زاویه شیار نیز مقدار عمق ترک کاهش می‌یابد (شکل۲).

نتیجه گیری

۱. در تمام زوایا و دماهای مورد آزمایش مقدار انرژی جذب شده درجهت D بیشترین مقدار را دارد. همچنین می‌توان گفت کمترین مقدار انرژی جذب شده در نمونه‌های درجهت X است و دیگر اینکه مقادیر انرژی ضربه به ترتیب درجهات D-Z-Y-X افزایش یافته است.

۲. افزایش زاویه شیار باعث تغییر نوع شکست به‌صورت نوع I می‌شود.

۳. اثر جهت در دماهای پایین خیلی مهم نیست زیرا تفاوت‌های خیلی بزرگ از خود نشان نمی‌دهند ولی در دماهای اتاق و بالاتر تغییرات عمده‌ای را با توجه به تغییر جهت از خود نشان می‌دهند.

۴. در بیشتر دماهای مورد آزمایش با افزایش زاویه شیار مقدار انرژی جذب شده کاهش می‌یابد و افزایش زاویه شیار باعث کاهش چقرمگی شکست می‌شود.

۵. در بیشتر زوایای شیار مورد آزمایش با افزایش دما مقدار انرژی جذب شده افزایش می‌یابد.

لغت‌نامه

(Impact energy)

انرژی ضربه	groove direction
جهت شیار	Shear failure
شکست برشی	Aluminum alloy
آلیاژ آلومینیم	ingot
شمش	microstructure
ریزساختار	Casting
ریخته گری	Toughness
چقرمگی	defeat
شکست	temperature
دما	failure soft
شکست نرم	crack
ترک	Tensile strength
استحکام کششی	aging
پیرسازی	surface
سطح	rolling
نورد	

مراجع

[1] D. Dumont, A. Deschamps, Y. Brechet, "On the relationship between microstructure, strength and toughness in AA7050 aluminum alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 356, no. 1-2, pp. 326-336, 2003.

[2] A. Lipski, S. Mroziński, "The effects of temperature on the strength properties of aluminium alloy 2024-T3," *acta mechanica et automatica*, vol. 6, no. 3, pp. 62-66, 2012.

[3] W. A. N. G. Bo, X. H. Chen, F. S. Pan, J. J. Mao, F. A. N. G. Yong, "Effects of cold rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of AA 5052 aluminum alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 25, no. 8, pp. 2481-2489, 2015.

[4] M. Tajally, E. Emadoddin, "Mechanical and anisotropic behaviors of 7075 aluminum alloy sheets," *Materials & Design*, vol. 32, no. 3, pp. 1594-1599, 2011.

[5] C. Mondal, A. K. Singh, A. K. Mukhopadhyay, K. Chattopadhyay, "Effects of different modes of hot cross-rolling in 7010 aluminum alloy: Part II. Mechanical properties anisotropy," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 44, pp. 2764-2777, 2013.

[6] J. Champlin, J. Zarkrajsek, T.S. Srivatsan, P.C. Lam, M. Manoharan, "Influence of notch severity on the impact fracture behavior of aluminum alloy 7055," *Materials and Design*, vol. 20, pp. 331-341, 1999.

[7] O. Engler, M. Crumbach, S. Li, "Alloy-dependent rolling texture simulation of aluminium alloys with a grain-interaction model," *Acta materialia*, vol. 53, no. 8, pp. 2241-2257, 2005.

[8] ASTM Standard E23-96, "Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials," ASTM, Philadelphia, PA, USA, 1998.

[9] R. Vignjevic, N. K. Bourne, J. C. F. Millett, T. De Vuyst, "Effects of orientation on the strength of the aluminum alloy 7010-T6 during shock loading: Experiment and simulation," *Journal of applied physics*, vol. 92, no. 8, pp. 4342-4348, 2002.

[10] J. Kraner, P. Fajfar, H. Palkowski, G. Kugler, M. Godec, I. Paulin, "Microstructure and texture evolution with relation to mechanical properties of compared symmetrically and asymmetrically cold rolled aluminum alloy," *Metals*, vol. 10, no. 2, pp. 156, 2020.

[11] K. O. Pedersen, T. Børvik, O. S. Hopperstad, "Fracture mechanisms of aluminium alloy AA7075-T651 under various loading conditions," *Materials & Design*, Vol. 32, no.1, pp. 97-107, 2011.

[12] M. Tajally, Z. Huda, H. H. Masjuki, "A comparative analysis of tensile and impact-toughness behavior of cold-worked and annealed 7075 aluminum alloy," *International journal of impact engineering*, vol. 37, no. 4, pp. 425-432, 2010.

[13] F. Goli, R. Jamaati, "Effect of strain path during cold rolling on the microstructure, texture, and mechanical properties of AA2024 aluminum alloy," *Materials Research Express*, vol. 6, no. 6, pp. 066514, 2019.

[14] L. Zhang, Y. Wang, X. Yang, K. Li, S. Ni, Y. Du, M. Song, "Texture, microstructure and mechanical properties of 6111 aluminum alloy subject to rolling deformation," *Materials Research*, vol. 20, pp. 1360-1368, 2017.

[15] S. K. Panigrahi, R. Jayaganthan, "Effect of rolling temperature on microstructure and mechanical properties of 6063 Al alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 492, no.1-2, pp. 300-305, 2008.

[16] C. K. Moy, M. Weiss, J. Xia, G. Sha, S. P. Ringer, G. Ranzi, "Influence of heat treatment on the microstructure, texture and formability of 2024 aluminium alloy," *Materials Science and Engineering: A,* vol. 552, pp. 48-60, 2012.

[17] W. M. Lee, M. A. Zikry, "Microstructural characterization of a high-strength aluminum alloy subjected to high strain-rate impact," *Metallurgical and Materials Transactions A,* vol. 42, pp. 1215-1221, 2011.